

文章编号：0258-0926(2021)03-0048-07; doi: 10.13832/j.jnpe.2021.03.0048

各向异性散射截面对快堆敏感性系数 计算影响研究

王冬勇¹, 马续波^{2*}, 朱润泽², 张斌², 彭星杰¹, 王连杰¹

1. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213;

2. 华北电力大学核科学与工程学院, 北京, 102206

摘要: 快能谱反应堆由于中子能量较高, 中子各向异性散射会对计算结果有重要影响。本文在计算弹性散射和非弹性散射截面敏感性系数时, 研究了高阶散射截面扰动对弹性散射和非弹性散射截面敏感性系数计算的影响。从理论上分析了隐式敏感性产生的原因和相关近似条件, 采用直接扰动方法计算了 ZPR-6/7 快能谱反应堆主要核素的主要反应道的敏感性系数。研究结果表明, 对于 ZPR-6/7 快能谱反应堆, 不扰动 ²³⁸U 高阶散射截面, 总的弹性散射截面的敏感性系数比考虑高阶散射截面时的敏感性系数高 44.3%, 不考虑 ⁵⁶Fe 高阶非弹性散射截面的扰动, 会造成非弹性散射截面敏感性系数偏高 28.9%, 而对其他核素的弹性散射和非弹性散射的敏感性系数影响较小。考虑到高阶散射截面后, 自主开发的程序 SUFR 计算的总的敏感性系数结果与国际同类程序 ERANOS 和 MCNP 的计算结果吻合很好, 最大偏差不超过 3.22%, 同时 ²³⁸U 的弹性散射反应道和 ⁵⁶Fe 的非弹性散射反应道对有效增殖因子不确定度分析的精度也有了很大提高。因此, 快堆敏感性系数计算需要考虑高阶散射截面影响, 同时敏感性和不确定度分析程序 SUFR 开发正确, 针对于快能谱反应堆进行敏感性系数的技术路线可行, 计算精度同国际同类程序的计算精度相当。

关键词: 敏感性系数; 快能谱反应堆; 各向异性散射; 不确定度分析

中图分类号: TL334 **文献标志码:** A

Study on Effect of Anisotropic Scattering Cross Section on Sensitivity Coefficient Calculation for Fast Reactors

Wang Dongyong¹, Ma Xubo^{2*}, Zhu Runze², Zhang Bin², Peng Xingjie¹, Wang Lianjie¹

1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China;

2. School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China

Abstract: Due to the high energy of neutrons in fast-spectrum reactors, the anisotropic scattering of neutrons is with great effect on the calculation results. In this study, the effects of high-order scattering cross-section perturbation on the calculation of elastic and inelastic cross-section sensitivity coefficients are studied when calculating the elastic and inelastic cross-section sensitivity coefficients. The causes of implicit sensitivities and related approximate conditions were theoretically analyzed. The direct perturbation method was used to calculate the sensitivity coefficients of the main nuclides reaction channel of the ZPR-6/7 fast-spectrum reactor. The research results show that for the ZPR-6/7 fast-spectrum reactor, without disturbing the ²³⁸U high-order scattering cross section, the sensitivity coefficient of the total elastic scattering cross section is 44.3% higher than that when the high-order scattering cross section is considered. Irrespective of the disturbance of ⁵⁶Fe high-order inelastic scattering cross section, it will cause the

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11875128)

作者简介: 王冬勇 (1992—), 男, 助理工程师, 工学硕士, 现从事反应堆物理研究工作, E-mail: 514323204@qq.com

*通讯作者: 马续波, E-mail: maxb@ncepu.edu.cn

sensitivity coefficient of inelastic scattering cross section to be 28.9% higher, but it has less influence on the sensitivity coefficients of elastic scattering and inelastic scattering of other nuclides. After considering the high-order scattering cross section, the total sensitivity coefficient calculated by the independently developed SUFR program is in good agreement with the ERANOS and MCNP results. The maximum deviation does not exceed 3.22%. At the same time, the accuracy of the uncertainty analysis of the effective multiplication factor caused by the elastic scattering reaction channel of ^{238}U and the inelastic scattering of ^{56}Fe has also been greatly improved. Therefore, the calculation of fast reactor sensitivity coefficient needs to consider the influence of high-order scattering cross section. At the same time, the sensitivity and uncertainty analysis program SUFR is developed correctly. The technical route for the sensitivity coefficient of fast energy spectrum reactors is feasible, and the calculation accuracy is the same as that of the famous international program.

Key words: Sensitivity coefficient, Fast-spectrum reactor, Anisotropic Scattering Cross Section, Uncertainty analysis

0 引言

第四代核能系统是一种具有更好的安全性和经济竞争力、能减少高放废物的产生以及防止核扩散的先进核能系统，代表了先进核能系统的发展趋势和技术前沿。针对第四代核能系统的工程设计，由于工程实践经验有限及系统自身的反应堆物理特点，导致反应堆物理计算存在较大不确定度。这里指的反应堆物理特点是指其能谱较硬，而在中高能区的截面测量的误差又比较大，导致有效增殖因子的绝大部分不确定度主要来自核截面数据库的不确定度^[1]。快能谱反应堆（快堆）是第四代核能系统中主要堆型，研究核数据的敏感性和不确定度分析对快堆设计具有重要意义。

近年来随着反应堆设计技术的发展，最佳估算加不确定度分析方法越来越受到重视，基于确定论方法的中子物理计算的不确定度分析是核电厂最佳估算加不确定度分析的重要内容。目前，应用反应堆敏感性和不确定度分析的方法主要有 2 种，分别是基于微扰理论的确定论方法和基于随机抽样的统计方法。如果需要研究的响应量个数有限，基于微扰理论的确定论方法具有较高的计算效率，已得到了国内外广泛的应用，并形成了相应的计算程序，如 CASMO-5^[2]、TSUNAMI-1D/3D^[3]、ERANOS^[4]。但基于微扰理论的确定论方法，通常只能考虑低阶不确定度的贡献，很难考虑高阶的效应，而基于随机抽样的敏感性和不确定度分析方法不仅可以考虑高阶效应，而且程序相对容易实现，研发的程序主要有 SUACL^[5]、SCALE-SS^[6]、DINOSAUR^[7]、MCNP^[8]、SURE^[9]、UNICORN^[10]等，但这些程序大多针对于压水堆，而针对快堆的相关研究较少。因此，

本文针对快堆的基于随机抽样的敏感性和不确定度分析方法，比较快堆与压水堆截面扰动方法的不同，并利用美国阿贡国家实验室的零功率钠冷快堆（ZPR-6/7 快堆）对该方法进行验证。

1 敏感性系数与不确定度计算

假设响应量 R 为 N 个输入变量 $(\alpha_1, \dots, \alpha_N)$ 的函数：

$$R = R(\alpha_1, \dots, \alpha_N) \quad (1)$$

这 N 个输入变量的真值 α 是由变量的最佳估计值和相应的不确定度组成：

$$\alpha = \alpha^0 + \delta\alpha = (\alpha_1^0 + \delta\alpha_1, \dots, \alpha_N^0 + \delta\alpha_N) \quad (2)$$

式中， δ 为扰动因子；上标 0 表示平均值。

对响应量 R 进行泰勒展开，并且在一阶近似可得：

$$\begin{aligned} R(\alpha_1, \dots, \alpha_N) &= R(\alpha_1^0 + \delta\alpha_1, \dots, \alpha_N^0 + \delta\alpha_N) \\ &= R(\alpha^0) + \sum_{i=1}^N \left(\frac{dR}{d\alpha_i} \right)_{\alpha^0} \delta\alpha_i \end{aligned} \quad (3)$$

通常定义输入变量 α_i 相对于响应量 R 的敏感性系数 S_i 为：

$$S_i = \frac{dR}{d\alpha_i} \quad (4)$$

如果考虑 α_i 有可能不是相互独立的，则上述敏感性系数公式可以化为：

$$S_i = \frac{dR}{d\alpha_i} = \frac{\partial R}{\partial \alpha_i} + \sum_j \left(\frac{\partial R}{\partial \alpha_j} \right) \left(\frac{\partial \alpha_j}{\partial \alpha_i} \right) \quad (5)$$

式中， j 为变量， $j=1,2,3,\dots,N$ 。

通常把式 (5) 中的偏微分部分 $\partial R/\partial \alpha_j$ 称为显式敏感性系数，而把由于参数之间存在不完全

独立的第 2 部分称为隐式敏感性系数。通常情况下对于快堆，利用窄共振近似就可以得到比较好的多群截面。对于无限大介质均匀系统，共振能群的有效截面 $\bar{\sigma}_g$ 可以采用下式计算：

$$\bar{\sigma}_g = \frac{\int_g \frac{\sigma(u)}{\sigma_t(u) + \sigma_0} du}{\int_g \frac{1}{\sigma_t(u) + \sigma_0} du} \quad (6)$$

式中， g 为能群； $\sigma(u)$ 为未扰动的连续能量点截面； $\sigma_t(u)$ 为未扰动的连续能量总截面； σ_0 为本底截面； $[\sigma_t(u) + \sigma_0]^{-1}$ 为权重谱。在快堆物理中，通常为了考虑核素之间的干涉效应，常采用迭代的方法计算本底截面，其计算方法为：

$$\sigma_0 = \frac{1}{N_i} \sum_{j \neq i} N_j \sigma_t^j(\sigma_0) \quad (7)$$

假设在能群 g 内，统一的扰动截面的扰动因子为 δ ，则扰动后的截面 $\bar{\sigma}'_g$ 为：

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}'_g &= \frac{\int_g \frac{(1+\delta)\sigma(u)}{\delta\sigma(u) + \sigma_t(u) + \sigma_0} du}{\int_g \frac{1}{\delta\sigma(u) + \sigma_t(u) + \sigma_0} du} \\ &= (1+\delta) \frac{\int_g \frac{\sigma(u)}{\sigma_t(u) + \sigma_0'} du}{\int_g \frac{1}{\sigma_t(u) + \sigma_0'} du} \quad (8) \end{aligned}$$

式中， σ_0' 为有效扰动本底截面， $\sigma_0' = \delta\sigma(u) + \sigma_0$ 。

如果截面扰动量非常的小，即满足：

$$\delta\sigma(u) \ll \sigma_t(u) + \sigma_0 \quad (9)$$

这时可以认为能谱截面扰动对中能谱的影响很小，可以采用 $\bar{\sigma}'_g = (1+\delta)\bar{\sigma}_g$ 对截面进行扰动。SCALE-SS 程序中采用了这种近似处理^[6]。法国计算程序 ERANOS 中同样忽略了敏感性系数中的隐式部分。这是因为当分截面扰动量为 $\delta=0.01$ 时，如辐射俘获、裂变截面，这时的扰动量肯定小于总截面 $\sigma_t(u)$ 的 1%（分截面小于总截面），因此可以认为满足式(9)的条件。由式(8)可以说明 2 个问题：隐式敏感性系数主要起源于中子能谱的变化；当式(9)近似成立时，可以认为中子能谱没有变化，此时隐式敏感性部分

对整个敏感性系数的贡献就可以忽略，但其优势在于采用 $\bar{\sigma}'_g = (1+\delta)\bar{\sigma}_g$ 对截面进行扰动，可以简化敏感性系数计算方法，而同时又保持较高的敏感性系数计算精度。本研究中采用了同样的近似处理，因此敏感性系数的计算变为：

$$S_i = \frac{\partial R}{\partial \alpha_i} \quad (10)$$

如果计算得到了响应量 R 对每个参数的敏感性系数，则可根据误差传递式(11)计算响应量 R 的协方差 $\text{var}(R)$ ，进而利用式(12)求得响应量 R 的标准偏差 ΔR ，即 R 的不确定度。

$$\text{var}(R) = \mathbf{S} \mathbf{V}_\alpha \mathbf{S}^T \quad (11)$$

$$\Delta R = [\text{var}(R)]^{1/2} \quad (12)$$

式中， \mathbf{S} 为敏感性系数向量，是 N 个参数组成的行向量； \mathbf{V}_α 为 $N \times N$ 的输入变量的协方差矩阵。

虽然都是对截面直接扰动，快堆截面扰动方法与压水堆有所不同，主要体现在 2 点：快堆中同一核素在不同位置具有不同的截面，因此在进行截面扰动时，需要对所有核素进行扰动，并且要保证不同位置处的相对扰动量一致；而通常压水堆是在共振自屏处理之前进行截面扰动，不需要区分不同位置；由于压水堆中各向异性散射不严重，因此除了几个原子序数比较低的核素之外，绝大部分核素只有勒让德展开零阶 (P_0) 截面，不用考虑高阶散射问题，而快堆中由于各向异性散射比较严重，需要对每个核素的高阶散射截面进行扰动，才能得到可靠的结果。每个核素的散射截面的扰动方法为：

$$\sigma'_{l,g \rightarrow g} = (1+\delta_g) \sigma_{l,g \rightarrow g} = P_g \sigma_{l,g \rightarrow g} \quad (13)$$

式中， l 为勒让德的阶数； $\sigma_{l,g \rightarrow g}$ 为某一核素第 l 阶、能群 g 到 g 的微观散射截面，也是扰动前的截面； $\sigma'_{l,g \rightarrow g}$ 为扰动后的截面； δ_g 为第 g 能群的扰动量。在进行敏感性系数计算时，每个能群的扰动量一般是一样的，通常设定为 1%，而在进行不确定度分析时，每个能群的扰动量是不一样的； P_g 为微扰因子。

如果各向异性散射不严重时，可以仅扰动 0 阶散射截面，即 $l=0$ ，但快堆中需要扰动包括 0 阶在内的高阶散射矩阵。

2 计算方法

为了产生多群截面的样本，首先需要知道各个能群之间的协方差矩阵。利用国际通用核截面处理软件 NJOY2016^[11]，基于评价核数据库 ENDF/B-VII.1^[12]，制作了多个核素的 33 群协方差矩阵，这些核素包括 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Pu 、 ^{56}Fe 、 ^{23}Na 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 、 ^{208}Pb 等。对于裂变核素和可裂变核素，制作的反应道包括总截面、裂变截面、辐射俘获截面、弹性散射截面、非弹性散射截面、 $(n, 2n)$ 反应截面、每次裂变释放的中子数以及裂变中子能谱等，而对于冷却剂和结构材料，协方差数据主要包括总截面、辐射俘获截面、弹性散射截面和非弹性散射截面等。

为了对快堆进行敏感性系数计算和不确定度分析，开发了快堆敏感性与不确定度计算程序 SUFR。该程序的计算流程图如图 1 所示。

SUFR 采用直接扰动法计算每个能群的敏感性系数，直接扰动方法即对每个反应道、每个能群的截面逐一进行数值扰动，获取响应量的变化，进而采用差商近似导数的方法，获得敏感性系数。根据式 (10)，该方法可以表示为：

$$S_g = \frac{\partial R}{\partial \sigma_g} \approx \frac{k_{\text{eff}}(1 + \delta\sigma_g) - k_{\text{eff}}(1 - \delta\sigma_g)}{2\delta\sigma_g} \quad (14)$$

式中， $\delta\sigma_g$ 为第 g 个能群的截面的扰动量，通常设定每个能群的截面的相对扰动量为该截面值的

1%； ∂R 为响应量的变化，如果 R 为有效增殖因子，则 ∂R 为有效截止增殖因子的变化。在实际计算中，通常采用正负各微扰 1% 的方法计算敏感性系数。

本文利用 2 种方法研究有效增殖因子的不确定度大小：方法 1：利用式 (14) 计算得到每个反应道的敏感性系数，然后再利用式 (12) 计算有效增殖因子的不确定度；方法 2：直接利用协方差矩阵产生的样本^[11]进行系统有效增殖因子的计算，通过对有效增殖因子的样本做统计分析，得到有效增殖因子的不确定度大小。最后对 2 种方法计算的结果进行对比。

3 计算结果分析

3.1 ZPR-6/7 快堆基准题

该反应堆采用钠为冷却剂，U-PU-Mo 为燃料，堆内含有 45×45 盒燃料，尺寸为 $5.52 \text{ cm} \times 5.52 \text{ cm}$ ^[13]。基于 ENDF/B-VII.1 核评价数据库制作了该反应堆的基准题截面，堆芯计算采用节块法 DIF3D。

3.2 各向异性截面影响

快堆不确定度分析中，需要分析的反应道主要有弹性散射、非弹性散射、辐射俘获、裂变截面及每次裂变释放的中子数等，这些反应道中与各向异性相关的截面主要有弹性散射和非弹性散射截面，而辐射俘获截面、裂变截面以及每次裂变释放的中子数与各向异性关系不大。针对 ZPR-6/7 快堆，计算 ^{238}U 和 ^{239}Pu 裂变反应的敏感性系数。比较程序 SUFR 计算结果与阿贡国家实验采用 ERANOS 程序的计算结果^[13]可以看出， ^{238}U 裂变敏感性系数最大位置的相对误差为 1.7%， ^{239}Pu 裂变截面敏感性系数最大的几处位置的相对误差都小于 3.0%，二者吻合很好。此外，程序 SUFR 计算每次裂变释放的中子数的结果与 ERANOS 的计算结果吻合也很好。

由于快堆的中子能谱较硬，快中子较多，并且在高能区中子散射异性强，因此在快堆物理计算中，必须要考虑中子的各向异性散射的影响。图 2 给出了考虑高阶散射截面微扰（方法 2）与不考虑高阶散射截面微扰（方法 1）2 种情况下程序 SUFR 与 ERANOS 的计算结果对比。由图 2 可见，当考虑高阶散射截面微扰时，弹性散射的

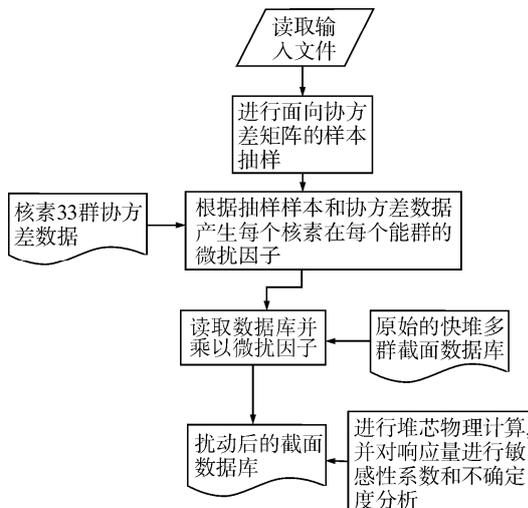
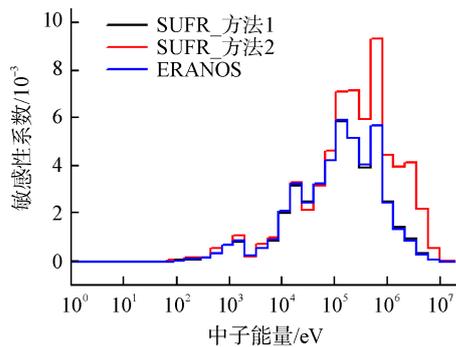


图 1 SUFR 程序计算流程图

Fig. 1 Calculation Flow Chart of SUFR Code

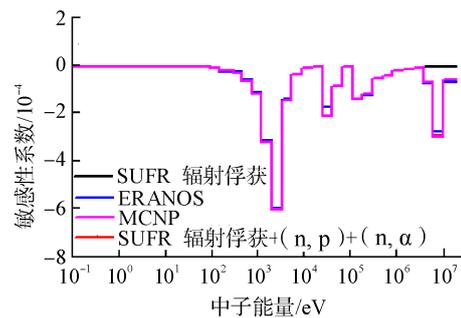
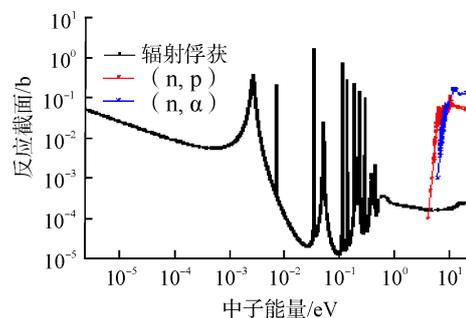
图2 ^{238}U 弹性散射敏感性系数对比分析Fig. 2 Comparison of Elastic Cross Section Sensitivity of ^{238}U

敏感性系数比不考虑高阶散射截面时低。这是因为当对高阶散射截面正扰动时，一阶散射截面增大会导致输运截面减小，进而导致扩散系数增加，最后导致弹性散射截面的敏感性系数减小。不考虑高阶散射截面时，总的弹性散射截面的敏感性系数比考虑高阶散射截面时的敏感性系数要高44.3%。研究还发现其他核素弹性散射截面的敏感性系数与 ^{238}U 核素类似。

通过对比发现， ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{23}Na 4种核素高阶非弹性散射截面（勒让德展开阶数1）是否做微扰对计算结果影响不大，但对于 ^{56}Fe 的计算结果有较大影响，不扰动高阶非弹性散射截面会造成敏感性数偏高。对于本基准题， ^{56}Fe 总的非弹性散射截面敏感性系数偏高28.9%。

3.3 辐射俘获截面敏感性系数

辐射俘获截面是中子吸收反应中重要的反应道，需要研究其敏感性系数，图3给出了 ^{23}Na 的辐射俘获截面敏感性系数的对比。由图3可见，在8 MeV以下能量点，程序SUFR与ERANOS的计算结果吻合很好，但在8 MeV附近差别较大，ERANOS和MCNP的计算结果都有一个明显的下降，而程序SUFR如果仅对辐射俘获截面做扰动，并没有明显下降这种现象。计算中，MCNP采用了KSEN卡及第2反应道。从输出结果看，MCNP不仅计算了辐射俘获反应道，还计算了(n, p)和(n, α)反应道。图4给出了 ^{23}Na 的辐射俘获反应截面、(n, p)和(n, α)反应截面随能量的变化关系。由图4可见，在8 MeV附近，(n, p)和(n, α)反应截面有一个明显的上升。当程序SUFR考虑(n, p)和(n, α)反应道以后，与

图3 ^{23}Na 的辐射俘获截面敏感性系数对比Fig. 3 Comparison of Capture Cross Section Sensitivity of ^{23}Na 图4 ^{23}Na 的辐射俘获截面、(n, p)和(n, α)反应截面随能量的变化Fig. 4 Capture, (n, p) and (n, α) Cross Section of ^{23}Na as a Function of Neutron Energy
1 b=10⁻²⁸ m²

ERANOS和MCNP的结果符合很好（图3）。其他核素的辐射俘获截面的敏感性系数符合也都很好。

3.4 敏感性系数计算结果对比

采用程序SUFR计算得到的钠冷快堆中5个重要核素的敏感性系数如表1所示。由表1可见，在ZPR-6/7快堆基准题中， ^{238}U 和 ^{239}Pu 具有较大的敏感性系数。对于 ^{238}U 核素而言，其辐射俘获截面和每次裂变释放的中子数的敏感性系数都比较大。而对于 ^{239}Pu 而言，裂变截面和每次裂变释放的中子数具有比较大的敏感性系数。表1还给出了ERANOS和MCNP计算的4个重要核素和4个重要反应道的敏感性系数，其中除 ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{239}Pu 和 ^{23}Na 辐射俘获截面的敏感性系数采用MCNP计算以外，其他反应道的敏感性系数都采用ERANOS计算^[13]。由表1可见，程序SUFR与ERANOS和MCNP的计算结果吻合很好，最大偏差不超过3.22%。由此说明，SUFR开发正确，且敏感性系数计算精度与国际同类软件计算

表 1 不同方法计算得到的各核素的敏感性系数对比

Tab. 1 Comparison of Sensitivity Results of Each Isotopes with Different Methods

反应道	ERANOS+MCNP	SUFR	相对误差/%
^{235}U 弹性散射截面	8.52×10^{-5}	8.73×10^{-5}	2.45
^{238}U 弹性散射截面	4.49×10^{-2}	4.51×10^{-2}	0.29
^{239}Pu 弹性散射截面	2.67×10^{-3}	2.76×10^{-3}	3.22
^{56}Fe 弹性散射截面	1.83×10^{-2}	1.87×10^{-2}	2.19
^{23}Na 弹性散射截面	1.08×10^{-2}	1.09×10^{-2}	0.56
^{235}U 非弹性散射截面	-8.88×10^{-5}	-8.91×10^{-5}	0.39
^{238}U 非弹性散射截面	-4.22×10^{-2}	-4.24×10^{-2}	0.50
^{239}Pu 非弹性散射截面	-2.74×10^{-3}	-2.78×10^{-3}	1.24
^{56}Fe 非弹性散射截面	-1.77×10^{-2}	-1.77×10^{-2}	-0.11
^{23}Na 非弹性散射截面	-7.48×10^{-3}	-7.62×10^{-3}	1.91
^{235}U 裂变	8.70×10^{-3}	8.83×10^{-3}	1.48
^{238}U 裂变	7.82×10^{-2}	7.96×10^{-2}	1.76
^{239}Pu 裂变	5.76×10^{-1}	5.84×10^{-1}	1.35
^{235}U 辐射俘获(MCNP)	-1.20×10^{-3}	-1.21×10^{-3}	0.83
^{238}U 辐射俘获(MCNP)	-2.45×10^{-1}	-2.39×10^{-1}	-2.65
^{239}Pu 辐射俘获(MCNP)	-6.91×10^{-2}	-7.00×10^{-2}	1.26
^{56}Fe 辐射俘获	-1.33×10^{-2}	-1.37×10^{-2}	3.16
^{23}Na 辐射俘获(MCNP)	-2.39×10^{-3}	-2.43×10^{-3}	1.80
^{235}U 每次裂变释放的中子数	1.27×10^{-2}	1.29×10^{-2}	1.02
^{238}U 每次裂变释放的中子数	1.28×10^{-1}	1.27×10^{-1}	-0.24
^{239}Pu 每次裂变释放的中子数	8.08×10^{-1}	8.17×10^{-1}	1.09

表 2 考虑与不考虑微扰高阶散射截面时有效增殖因子不确定度计算结果

Tab. 2 Calculation Results of k_{eff} Uncertainty with or without Perturbation Higher-Order Scattering Cross Section

程序	是否考虑高阶散射截面的扰动	^{238}U 弹性散射截面	^{56}Fe 非弹性散射截面
SUFR	不考虑	2.24×10^{-3}	7.00×10^{-4}
	考虑	9.81×10^{-4}	1.09×10^{-3}
ERANOS	—	9.63×10^{-4}	1.09×10^{-3}

“—” 无此选项

精度相当。

3.5 不确定度结果对比

高阶散射截面扰动对有效增殖因子不确定度的影响如表 2 所示。表 2 分别给出了考虑与不考虑高阶散射截面扰动时，程序 SUFR 与 ERANOS 计算结果的对比。对于 ^{238}U 弹性散射截面而言，不考虑高阶散射截面的扰动，将会导致该反应道对有效增殖因子的不确定度偏高 133%，而导致 ^{56}Fe 的非弹性散射截面对有效增殖因子的不确定度偏低 35.8%。而当考虑高阶散射截面扰动以后，偏差分别降低为 1.9% 和 0%。由此说明，对于 ^{238}U 的弹性散射截面和 ^{56}Fe 的非弹性散射截面，考虑高阶非弹性散射截面的扰动是非常有必要的。

4 结论

本研究针对快堆的物理特点，首先从理论上分析了隐式敏感性产生的原因及相关近似的条件，研究了在计算弹性散射和非弹性散射截面敏感性系数时，高阶散射截面扰动与否对弹性散射和非弹性散射截面敏感性系数计算的影响。计算结果表明，对于 ^{238}U ，不扰动高阶散射截面时总的弹性散射截面的敏感性系数比考虑高阶散射截面时的敏感性系数高 44.3%；而对于 ^{56}Fe 的非弹性散射截面，不考虑高阶非弹性散射截面的扰动会造成非弹性散射截面敏感性系数偏高 28.9%。考虑高阶散射截面扰动后，SUFR 与 ERANOS 的不确定度计算结果吻合更好。由此说明，在计算

快堆的弹性和非弹性散射截面的敏感性系数时，高阶散射截面有可能会对总的敏感性系数产生重要影响，因此必须要予以考虑。以上是针对ZPR-6/7快堆的计算结果，针对于其他快能谱反应堆，高阶散射截面扰动的影响大小仍需要具体分析。对比程序SUFR与ERANOS和MCNP的敏感性系数计算结果可见，敏感性和不确定度分析程序SUFR开发正确，计算精度同国际同类程序的计算精度相当。

参考文献：

- [1] 张坚. 钠冷快堆核设计不确定度分析研究[D]. 北京：中国原子能科学研究院，2018.
- [2] RHODES J, SMITH K, LEE D. CASMO-5 development and application[C]. Vancouver, Canada: Springer, 2006.
- [3] REARDEN B T. TSUNAMI-3D: Control module for three-dimensional cross section sensitivity and uncertainty analysis for criticality: ORNL/TM-2005/39 [R]. USA: Oak Ridge National Laboratory, 2009.
- [4] GÉRALDRIMPAULT, JACQMIN R. The ERANOS code and data system for fast reactor neutronic analyses[C]. Seoul, Korea: Physor 2002, 2002.
- [5] MA X B, LIU J Y, XU J Y. Investigation of antineutrino spectral anomaly with reactor simulation uncertainty[J]. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018(906): 97-102.
- [6] BALL M R. Uncertainty analysis in lattice reactor physics calculations[D]. Canada: McMaster University, 2012.
- [7] ROCHMAN D, KONING A J, VAN DER MARCK S C, et al. Nuclear data uncertainty propagation: Total Monte Carlo vs. covariances[J]. Journal of Korean Physical Society, 2011, 59(2): 1236-1241.
- [8] BALL M R, NOVOG D R, LUXAT J C. Analysis of implicit and explicit lattice sensitivities using DRAGON[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, (265): 1-12.
- [9] 胡泽华, 叶涛, 刘雄国, 等. 抽样法与灵敏度法 k_{eff} 不确定度量化[J]. 物理学报, 2017, 66(1): 0128011-0128019.
- [10] 万承辉, 曹良志, 吴宏春, 等. 基于抽样方法的特征值不确定度分析[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(11): 1954-1960.
- [11] MACFARLANE R E. The NJOY nuclear data processing system: LA-UR-12-27079[R]. Chicago: Los Alamos National Security Laboratory, 2012.
- [12] CHADWICKA M B, HERMANB M, OBLOŽINSKÝ P, et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data[J]. Nuclear Data Sheets, 2011, 112(12): 2887-2996.
- [13] SALVATORES M. Methods and issues for the combined use of integral experiments and covariance data: NEA/NSC/WPEC/DOC(2013)445[R]. Bulgaria: Nuclear Energy Agency, 2013.

(责任编辑：孙 凯)